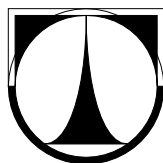


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2013

Marek Jelínek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1234R567 – Elektronické informační řídicí systémy

Návrh koncepce a praktická realizace funkčního vzorku robotické multikoptéry.

Design and practical implementation of robotic multicopter sample.

Bakalářská práce

Autor:

Marek Jelínek

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Petržílka

Konzultant:

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.

V Liberci 18. 5. 2013

Zadání bakalářské práce

Příjmení a jméno studenta (osobní číslo - nepovinné)	Marek Jelínek
Zkratka pracoviště	ITE
Datum zadání BP/DP	1. 10. 2012
Plánované datum odevzdání	20. 5. 2013
Rozsah grafických prací	dle potřeby dokumentace
Rozsah průvodní zprávy	cca 30 stran
Název BP/DP (česky)	Návrh koncepce a praktická realizace funkčního vzorku robotické multikoptéry
Název BP/DP (anglicky)	Design and practical implementation of robotic multicopter sample.
Zásady pro vypracování BP/DP (text nijak neformátujte, pouze očísľujte jednotlivé body .. 1) ... 2) ... atd. a každý bod uveďte jako nový odstavec):	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Nastudujte teorii související s realizací multikoptér 2. Analyzujte možné koncepce jejich řešení. 3. Navrhňte a optimalizujte praktické řešení funkčního modelu. 4. Provedte praktické zkoušky funkčnosti 	
Seznam odborné literatury (text nijak neformátujte, pouze každou položku uveďte jako nový odstavec):	
<p>W. Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag Berlinund Heidelberg GmbH & Co. Kg, 2001, ISBN-13:9783540418207</p> <p>P. Novák, Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení, BEN - Technická Literatura, 2005, ISBN: 80-7300-141-1 / 9788073001414</p> <p>Katalogové listy aplikovaných komponent</p>	
Vedoucí BP/DP	Ing. Leoš Petržílka
Konzultant BP/DP (u externích pracovníků uveďte plný název pracoviště – firmy)	prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Leošovi Petržílkovi za jeho cenné rady ohledně návrhu desky plošných spojů v prostředí eagle, opravování chyb, doporučení optimálního řešení problému a veškerých dalších aktivit, kterých bylo potřeba pro dokončení této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje problematiku létajících strojů zvaných „multicopters“ (česky též „multirotoř“). Uveden je zde základní rozbor pojednávající o konstrukci a funkci multikoptéry. Práce zahrnuje také fyzikální rozbor zařízení. Součástí práce je popis vlastní konstrukce stroje, realizovaného regulátoru a provedení různých měření a vylepšení.

Klíčová slova

Quadrokoptéra, KK2 , regulátor, BLDC, PWM

Abstract

This bachelor essay describes the problem of flying machines called "Multicopters" (in Czech called also as "Multirotoř"). There is given the primary analysis, which discuss the construction and function of Multicopters. The essay discuss also physical description of the machine. Described is also the custom design of machine, implemented controller and perform of various measurements and improvements.

Keywords

Quadrocopter, KK2 , controller, BLDC, PWM

Obsah

Zadání bakalářské práce	3
Prohlášení	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Klíčová slova	5
Abstract.....	5
Keywords.....	5
Obsah	6
Seznam obrázků	7
Seznam tabulek.....	7
Seznam zkratk	8
1 Úvod	9
2 Koptéry.....	10
2.1 Srovnání koptér s vrtulníkem	12
2.2 Princip letu koptér	13
3 Fyzikální rozbor quadrokoptéry	14
3.1 Fyzikální popis rotačního pohybu quadrokoptéry podle os X a Y	15
3.2 Rotační pohyby v ose Z.....	17
3.3 Posuvný pohyb v osách X a Y.....	17
3.4 Posuvný pohyb v ose Z	18
4 Koncepce quadrokoptéry.....	19
4.1 Blokové schéma zařízení	20
4.2 Napájecí zdroj.....	21
4.3 Komunikace	23
4.4 Řídící jednotka	24
4.4.1 Senzorický subsystém řídící jednotky KK2.....	27
4.4.2 Stabilizace	27
4.4.3 Vyvážení quadrokoptéry.....	28
4.4.4 Statická kalibrace vrtulí	29
4.5 Regulátory	30
4.5.1 Kalibrace regulátoru	31
4.6 Akční členy.....	33
4.6.1 Elektromotory BLDC	33
5 Popis funkce vlastního regulátoru	37
5.1 Snímání EMF.....	39
5.2 Tranzistory.....	39
5.3 Návrh desky plošných spojů regulátoru	40
5.4 Schéma regulátoru	41

5.5 Generátor PPM signálu	42
5.5 Porovnání regulátorů	43
6 Praktická realizace multikoptéry.....	45
7 Závěr.....	46
8 Seznam použité literatury	47

Seznam obrázků

1. obrázek: Quadrokoptéra [6]	10
2. obrázek: Trikoptéra [6]	11
3. obrázek: Hexakoptéra [6]	11
4. obrázek: Rozmístění vrtulí a znázornění jejich směru	13
5. obrázek: Fyzikální rozbor quadrokoptéry	14
6. obrázek: Přehled komponent.....	20
7. obrázek: řídicí jednotka KK2 [1]	25
8. obrázek: Regulátor od firmy TURNINGY [7]	31
9. obrázek: Stejnoseměrný synchronní bezkomutátorový motor [8]	35
10. obrázek: NTM Prop Pohon Series 28-26A 1200 kv od firmy TURNINGY [9]	35
11. obrázek: konstrukční konstanty motoru [9]	36
12. obrázek: Realizovaný regulátor.....	37
13. obrázek: spínací sekvence jednotlivých tranzistorů[11]	38
14. obrázek: Ilustrativní napěťové průběhy jednotlivých fází při měření EMF	39
15. obrázek: Plošný spoj navržený v prostředí EAGLE 6.3.0	40
16. obrázek: Schéma regulátoru	41
17. obrázek: Schéma generátoru PPM signálu.....	42
18. obrázek: Průběh jednotlivých fází komerčního regulátoru	44
19. obrázek: Průběh jednotlivých fází navrhovaného regulátoru.....	44
20. obrázek: Realizovaná Quadrokoptéra	45

Seznam tabulek

Tabulka 1: PI editor	25
Tabulka 2: Mode settings.....	25
Tabulka 3: StickScaling	26
Tabulka 4: Miscsettings.....	26
Tabulka 5: Mixer editor	26
Tabulka 6: Selflevelsettings.....	26
Tabulka 7: Logické úrovně jednotlivých stavů fází pro obrázek 14.	38

Seznam zkratek

BEC	(Battery eliminating circuit) - stabilizátor napětí
PPM	Pulzně poziční modulace (Pulse-Position Modulation)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse-width modulation)
ESC	elektronický regulátor otáček (electronic speed controler)
BLDC	Stejnoseměrné trojfázové bezkomutátorové motory (Brushless dc motors)
EMF	Zpětná elektromotorická síla
LI-PO	Lithium Polymerové baterie
Li-Fe	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Pitch	Naklopení podél příčné osy
Yaw	Natočení kolem svislé osy
Roll	Natočení kolem podélné osy

1 Úvod

Multikoptéry je všeobecné označení pro vícerotorová létající zařízení. Nejvíce se těmto zařízením podobá klasický vrtulník.

U všech těchto létajících strojů je snaha, aby veškeré komponenty měly co nejmenší hmotnost a rozměry, aby příliš nezatěžovaly celou konstrukci.

Díky použití více rotorů je však ovládání směru a manévrovatelnost založena na úplně jiném principu.

Tato bakalářská práce analyzuje možné koncepce a zabývá se návrhem vhodné mechanické konstrukce. Zaobírá se principy, aplikací a nastavením elektroniky řízení a ovládání jednotlivých rotorů. Součástí práce je návrh vlastního regulátoru otáček rotoru se známou a otevřenou koncepcí použitelnou pro další pokusy a bádání na těchto strojích.

K prvním pokusům a zkouškám funkčnosti je zde použita komunikační jednotka složená z vysílače a přijímače, jehož signál je pak dále zpracováván řídicí jednotkou. Tato komunikační jednotka slouží k dálkovému řízení celého zařízení.

Problematika robotů postavených na principu vícerotorových zařízení je v rámci závěrečných prací na TUL řešena poprvé, tato bakalářská práce je teprve prvním krokem k získání potřebných informací v této oblasti.

2 Koptéry

Multikoptéry je obecné označení pro létající stroje, které pro svůj provoz využívají více rotorů. Pro jednoduchost a vyšší přehlednost bude v textu používáno jen Koptéry.

Koptéry jsou svou strukturou podobné vrtulníkům ovšem s tím rozdílem, že koptéry mají minimálně tři vrtule. Celé zařízení je tvořeno rámem, který je v našem případě hliníkový ovšem tyto rámy mohou být i plastové nebo i dřevěné. Na obvodu rámu jsou připevněny rotory. Všechna tyto zařízení pracují nejčastěji s napájecím zdrojem v podobě Li-PO nebo Li-Fe akumulátoru, který je schopný dodat požadované proudy pro celé zařízení.

Důležitým prvkem pro celou konstrukci je řídicí jednotka, která se stará o stabilitu celého zařízení a použité regulátory, které pracují s řídicími impulzy z řídicí jednotky a regulují tak otáčky jednotlivých rotorů.

Nejčastější konstrukce koptér obsahuje čtyři rotory, existují však i konstrukce se třemi nebo i šesti a více rotory

Ukázky jednotlivých konstrukcí:

Quadrokoptéra:



1. obrázek:Quadrokoptéra [6]

Trikoptéra :



2. obrázek: Trikoptéra [6]

Hexakoptéra :



3. obrázek: Hexakoptéra [6]

2.1 Srovnání koptér s vrtulníkem

Koptéry se pohybují přímočarým a rotačním pohybem podobně jako vrtulníky. Uspořádání rotorů v tomto případě je oproti vrtulníkům zcela odlišné, díky tomu se tak liší principy řízení a ovládání letu řízení. Odlišnost těchto dvou zařízení je v jejich stabilizaci, koptéry jsou díky svému konstrukčnímu uspořádání více stabilní.

Pokud bychom porovnali obě zařízení, koptéry mohou použít vzhledem k počtu vrtulí mnohem menší vrtule než je tomu u vrtulníku, ale hlavně je celé zařízení méně náchylné na mechanická poškození, jelikož u koptér můžeme vrtuli chránit rámem, aby se nepoškodila.

Koptéry jsou díky vyváženosti rámu daleko stabilnější než vrtulníky, což se promítne ve větší stabilitě letu. Větší počet rotorů nám zajišťuje větší bezpečnost, jelikož vrtule nemusí být tak velké jak je tomu u vrtulníků, a je tedy možné vrtule opatřit bezpečnostním rámem, který chrání vrtule i okolí. Z tohoto faktu vyplývá i to, že zpravidla jsou koptéry daleko lépe přizpůsobeny nepříznivým povětrnostním podmínkám na rozdíl od vrtulníků.

Ovládání je u vrtulníku stejné jako u koptér, ovšem rozdíl je v elektrickém řízení, kde dochází k rozdělení tahu a otáček mezi jednotlivé rotory.

V případě koptér je díky více rotorům elektrické řízení jednodušší. U vrtulníku jsou otáčky konstantní a mění se pouze úhel sklonu listu vrtule, což má za následek změnu celkového vztahu. U koptér se však mění přímo jednotlivé otáčky motoru. U vrtulníku je tedy mnohem horší zpětná vazba.

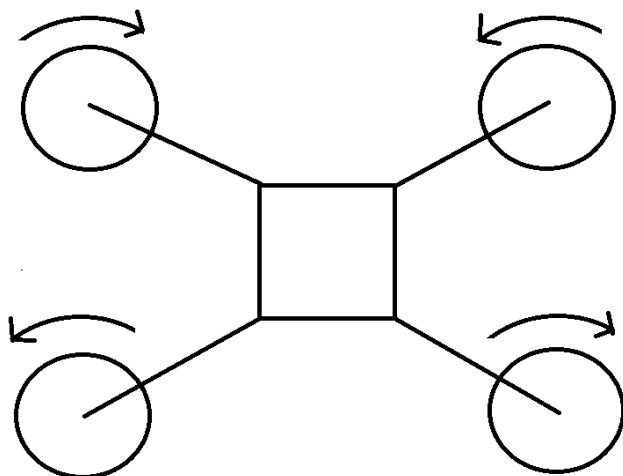
Koptéry se dají využít jako průzkumné prostředky především v prostorách, kam bychom se s jinými zařízeními vůbec nedostali. Můžeme s nimi zkoumat těžko dostupná místa ve velkých výškách, mosty nebo třeba revize vysílačů. Možné je také jejich použití při živelných katastrofách, jako jsou povodně a zemětřesení, kde jsou neocenitelným pomocníkem při „mapování“ terénu. Dále se dají využít jako monitorovací prostředek pro hlídání majetku, objektů atd. Další možné využití je například při demonstracích a jiných shlukových shromážděních. Zařízení může manipulovat s různými objekty při výrobě nebo při jejich uskladňování. Ve vojenské technice je možné použít toto zařízení s využitím termokamery na identifikaci osob, raněných nebo jako špiónážní prostředek mapující terén. Nevýhodou je, že toto zařízení může být také zneužito, proto tato zařízení vyžadují povinnou registraci.

V poslední řadě je možné zařízení využít pro zábavu, kdy můžeme například vytvářet nejrůznější světelné efekty přímo na obloze atd.

2.2 Princip letu koptér

– obrázek rozmístění směru vrtulí

Rozmístění vrtulí a znázornění jejich směru:



4. obrázek: Rozmístění vrtulí a znázornění jejich směru

Všechny koptéry pracují na podobném principu a to tak, že se otáčky na jednotlivých rotorech buď zvyšují, nebo snižují pro dosažení požadovaného směru pohybu. Jelikož je v této práci hlavní náplní quadrokoptéra, bude základní princip vysvětlen pro tento druh koptéry.

Pro řízení quadrokoptéry jsou definovány tyto pojmy:

Pitch-naklopení podél příčné osy

Yaw-natočení kolem svislé osy

Roll-natočení kolem podélné osy

Řídící jednotka se snaží quadrokoptéru za pomoci tří gyroskopů vyrovnávat, jsou zde definovány souřadnice osy X,Y,Z.

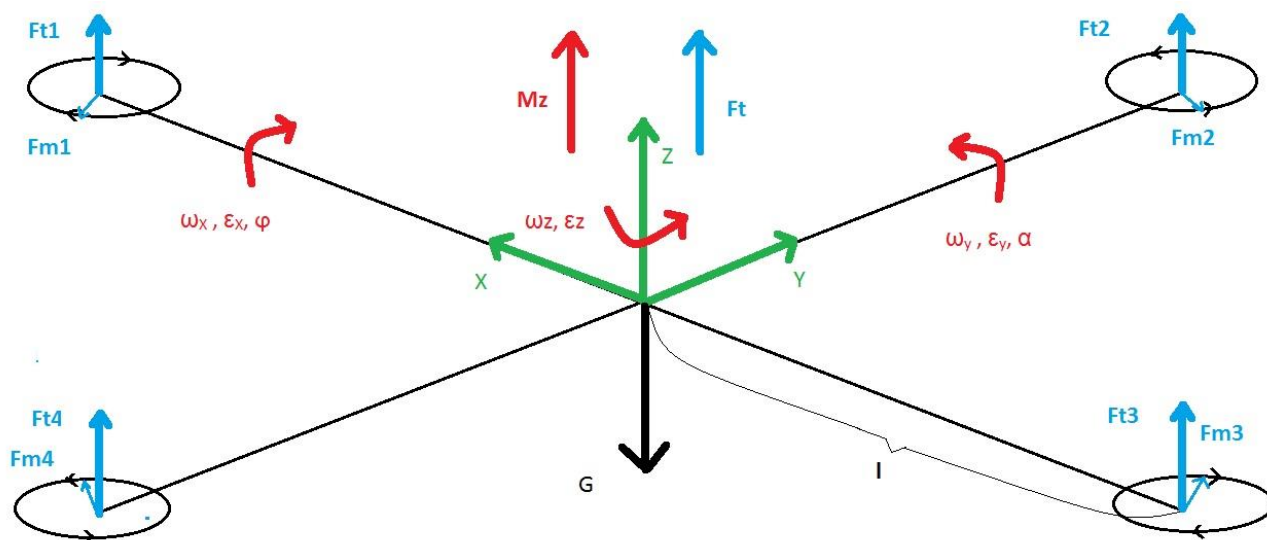
Princip klopení je takový, že se zvýší nebo sníží otáčky zadní nebo přední vrtule. Jelikož rotory nepracují rovnoměrně, quadrokoptéra se naklání na určitou stranu. Díky tomuto naklopení nesměřují výsledné síly tahu rotorů pouze nahoru, jak je tomu za normálních okolností, ale tento výsledný silový vektor směřuje dopředu nebo dozadu. To má za následek, že se celé zařízení naklápí buď dopředu, nebo dozadu v závislosti na tom, které otáčky jednotlivých rotorů jsou sníženy nebo zvýšeny.

Princip klonění je de facto úplně stejný jako klopení ovšem s tím rozdílem, že se nemanipuluje s předními a zadními vrtulemi, nýbrž s vrtulemi pravými a levými. Díky tomu se celý stroj naklání doprava nebo doleva v závislosti na otáčkách pravých a levých rotorů. A to díky tomu, že potřebně zvýšíme nebo snížíme otáčky potřebné dvojice levých nebo pravých rotorů, čímž se silové momenty nerovnájí a zařízení se naklání.

Rotace quadrokoptéry se provádí tak, že se změní poměr levotočivých a pravotočivých otáček. Díky tomu vznikne nenulový točivý moment, který působí ve směru svislé osy Z a celé zařízení se začne otáčet kolem své osy.

Pokud chceme aby quadrokoptéra byla na místě v konstantní pozici, musejí se momenty jednotlivých rotorů rovnat.

3 Fyzikální rozbor quadrokoptéry



5. obrázek: Fyzikální rozbor quadrokoptéry

Nákres jednotlivých silových složek a momentů, které působí na quadrokoptéru na základě tohoto nákresu situace byl proveden tento následující fyzikální rozbor:

3.1 Fyzikální popis rotačního pohybu quadrokoptéry podle os X a Y

Naklonění quadrokoptéry je možné provádět přímo pomocí tahů F_{ti} , což jsou jednotlivé tažné síly příslušných rotorů, které mají za výsledek vznik momentů síly v osách X, Y. Vztahy, sloužící k fyzikálnímu popisu situace [13]:

Momenty X a Y

Vyjádření momentu M_x ze vztahu (1):

$$M_x = M_4 - M_2 \quad (1)$$

Momenty M_2 , M_4 ze vztahu (2), (3) je možné získat dosazením:

$$M_2 = F_{t2} * l \quad (2)$$

$$M_4 = F_{t4} * l \quad (3)$$

Pro výsledný moment M_x tedy platí (4):

$$M_x = (F_{t4} - F_{t2}) * l \quad (4)$$

Vyjádření momentu M_y ze vztahu (5):

$$M_y = M_3 - M_1 \quad (5)$$

Momenty M_1 , M_3 ze vztahu (6), (7) je možné získat dosazením:

$$M_1 = F_{t1} * l \quad (6)$$

$$M_3 = F_{t3} * l \quad (7)$$

Výsledný moment M_y lze získat dosazením (8):

$$M_y = (F_{t3} - F_{t1}) * l \quad (8)$$

M_x , M_y – momenty kolem jednotlivých os X, Y [N*m]

F_{t1} , F_{t2} , F_{t3} , F_{t4} – tažné síly vrtulí [N]

l – délka ramene v [m]

Úhlové zrychlení quadrokoptéry kolem os X a Y dle vztahu (9), (10):

$$\varepsilon_x = \frac{M_x}{J_x} \quad (9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_y}{J_y} \quad (10)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – úhlové zrychlení okolo os X Y [φ/s^2]

J_x, J_y – moment setrvačnosti robota okolo os X, Y [$kg \cdot m^2$]

Vyjádření úhlové rychlosti kolem osy X (11):

$$\omega_x = \frac{d\varphi}{dt} \quad (11)$$

Odvození úhlového zrychlení kolem osy X (12):

$$\varepsilon_x = \frac{d\omega_x}{dt} = \varphi''(t) \quad (12)$$

Vyjádření úhlové rychlosti kolem osy Y (13):

$$\omega_y = \frac{d\alpha}{dt} \quad (13)$$

Odvození úhlového zrychlení kolem osy Y (14):

$$\varepsilon_y = \frac{d\omega_y}{dt} = \alpha''(t) \quad (14)$$

ω_x, ω_y – úhlová rychlost okolo os X, Y [φ/s]

φ, α – úhlové natočení v osách X, Y [φ]

3.2 Rotační pohyby v ose Z

Rotační pohyb kolem osy Z má za následek změnu směru. Tato rotace je způsobena reakčními momenty jednotlivých vrtulí. Reakční moment M_{Ri} každé vrtule způsobuje sílu F_{Mi} , která působí na rám quadrokoptéry v místech uchycení rotorů. Celkový moment M_Z , který způsobuje rotaci kolem osy Z, je pak dán vztahem (15):

$$M_Z = (-F_{m1} - F_{m2} + F_{m3} + F_{m4}) * l \quad (15)$$

M_Z – moment síly působící okolo osy Z [N*m]

$F_{M1}, F_{M2}, F_{M3}, F_{M4}$ – síly způsobené momenty $M_{R1}, M_{R2}, M_{R3}, M_{R4}$ [N]

l – délka ramene [m]

K rotaci kolem osy Z dochází tehdy, když je moment M_Z nenulový.

3.3 Posuvný pohyb v osách X a Y

Celkový tah F_t vyvolaný všemi vrtulemi, se při vodorovné poloze quadrokoptéry nachází pouze v ose Z. Při náklonu robota se tato síla rozkládá mezi zbylé osy X a Y, dochází tak k posuvnému pohybu zařízení. Tyto silové složky mají za důsledek to, že se quadrokoptéra v jednotlivých osách posouvá.

Rychlost ve směru X určíme první derivací dráhy podle času ze vztahu (16):

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

Pro zrychlení v ose X tedy platí (17):

$$a_x = \frac{F_{tx}}{m} \quad (17)$$

Pro rychlost ve směru Y platí (18):

$$v_y = \frac{dy}{dt} \quad (18)$$

Pro zrychlení v ose Y tedy platí (19):

$$a_y = \frac{F_{ty}}{m} \quad (19)$$

F_{tx}, F_{ty} – složka celkového tahu vrtulí v osách X a Y [N]

a_x, a_y – zrychlení v osách X a Y [$m \cdot s^{-2}$]

m – hmotnost robota [kg]

v_x, v_y – rychlost v osách X a Y [$m \cdot s^{-1}$]

x, y – poloha v osách X a Y [m]

Pro zrychlení a_x, a_y tedy platí (20), (21):

$$ax = \frac{dv_x}{dt} = x''(t) \quad (20)$$

$$ay = \frac{dv_y}{dt} = y''(t) \quad (21)$$

Při posuvném pohybu v osách X,Y dochází k celkovému snížení silové složky F_{tz} , jelikož důsledkem naklonění se síla F_{tz} rozloží na složku X,Y,Z. Zařízení proto nepůsobí tak velkou vztlakovou silou a začne ztrácet letovou výšku. Tato ztráta celkové síly F_{tz} musí být nahrazena celkovým zvýšením tahu všech vrtulí aby zařízení při tomto druhu pohybu neklesalo.

3.4 Posuvný pohyb v ose Z

Tento druh pohybu je primárně závislý na celkovém tahu F_t . Jelikož se jedná o pohyb nahoru/dolů, je tento pohyb závislý pouze na rovnoměrném přidávání otáček všech vrtulí, které působí na celkové zrychlení quadrokoptéry:

Zrychlení quadrokoptéry v ose Z vyplívá ze vztahu (22):

$$az = F_{tz} * m \quad (22)$$

a_z – zrychlení v ose Z [$m \cdot s^{-2}$]

F_{tz} – tažná síla vrtulí v ose Z [N]

Kde platí (23):

$$az = \frac{dv_z}{dt} = z''(t) \quad (23)$$

v_z – rychlost v ose ZE [$m \cdot s^{-1}$]

z – poloha v ose ZE [m]

Celková hmotnost quadrokoptéry m má za důsledek celkovou velikost gravitační síly G , která velice ovlivňuje tento pohyb. Gravitační síla je způsobena gravitačním zrychlením podle(24):

$$G = m * g \quad (24)$$

G – gravitační síla [N]

g – gravitační zrychlení, $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

Nutná podmínka pro vzlet quadrokoptéry je (25):

$$F_{tz} > G \quad (25)$$

4 Koncepce quadrokoptéry

Jak bylo již řečeno, celé zařízení zvané quadrokoptéra pracuje se čtyřmi rotory, které jsou připevněny na obvodu rámu, pravidelně konstrukčně otočeny o 90° a uspořádány do čtvercové topologie.

Existují ovšem i jiné koncepce realizace koptér a to nejčastěji hexakoptér, trikoptér atd. Jelikož se v této práci řeší konkrétní typ quadrokoptéry, tak bude tato koncepce vysvětlena pouze pro tento případ.

Tato konstrukce byla koncipována pro 3-fázové synchronní stejnosměrné bezkomutátorové motory zvané BLDC. Důvodem bylo, že se jejich provoz jevil nejúsporněji a zároveň jejich životnost je dlouhodobá, mají veliké zrychlení, žádné rušení a jiskření, jako tomu je v kartáčových komutátorových motorech, a mnohem vyšší rozsah rychlosti. Ovšem tyto motory mají jednu nevýhodu a to, že potřebují ke svému provozu regulátor neboli frekvenční měnič.

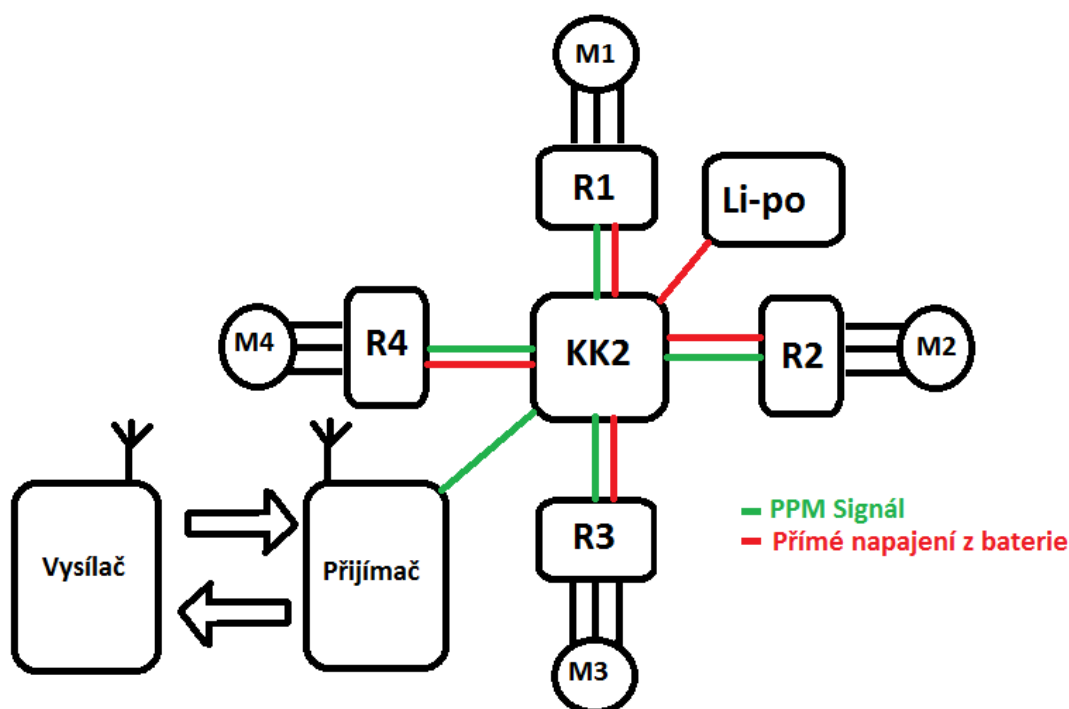
Dalším prvkem konstrukce jsou regulátory, které se starají o rozběh a chod BLDC motorů. Pracují na principu stejnosměrné PWM regulace, kde za pomoci zpětnovazební EMF (elektromotorické síly) získávají informaci o tom, kde se právě nachází hřídel rotoru. Vinutí jednotlivých fází motoru jsou vyvedeny na referenční komparátor, který tyto hodnoty porovnává a odesílá do procesoru, který na základě této zpětné vazby přerozděluje řídicí impulzy pro vybuzení tranzistorů v silové části regulátoru. Regulátory dělíme podle jejich proudové zatížitelnosti. Výrobce u našeho typu BLDC motoru udává konstantní proud 18A a rozběhový až 20A. Na základě tohoto parametru byl vybrán regulátor s proudovou rezervou a konstantním proudem 30A.

Celé zařízení je napájeno z akumulátoru Li-PO, který byl vybrán především na základě parametrů motorů. Jelikož rotory odebírají cca 18A, byl vybrán 3-článekový akumulátor Li-PO s kapacitou 2200mAh, který se na základě parametrů kapacita/cena projevil jako dostatečný. Hlavní nevýhodou těchto akumulátorů je, že čím je větší kapacita, tím je podstatně vyšší cena.

Všechny 4 regulátory jsou připojeny do řídicí jednotky KK2. Tato řídicí jednotka byla vybrána, protože umožňuje přesné a stabilní naprogramování i v terénu bez připojování externího zařízení. Což je velká výhoda, jelikož se dá pokaždé přímo na místě kalibrovat a i případně přeprogramovat. Za pomoci 3-osých gyroskopů má za úkol držet celé zařízení ve stabilní pozici a posílat řídicí PPM impulzy do regulátorů. Jednotka získává řídicí impulzy od přijímače a pracuje s PPM signálem, což je obdélníkový signál, kde je informace úměrná šířce pulzu. Regulátory jsou napájeny přímo z baterie.

Cílem této práce bylo seznámit se s možnými koncepcemi stroje a posléze základě rozvahy toto zařízení navrhnout a sestavit. Tento druh koptéry bude v dalších verzích rozšiřován, a to za pomoci nejrůznějších čidel, které nám umožní měřit hodnoty na quadrokoptéře a to i za letu. Což je velice výhodné, jelikož ve vzduchu na celé zařízení působí další vlivy, které mohou zásadně ovlivnit chování jednotlivých členů. Dále by tato práce mohla být rozšířena o gps modul a softwarového nastavení autopilota. Což by znamenalo, že by odpadlo manuální řízení.

4.1 Blokové schéma zařízení



6. obrázek: Přehled komponent

Vysvětlení zkratk jednotlivých komponent z obrázku 6.:

Vysílač – Vysílač dálkového ovládání DEVO 7

Přijímač – Přijímač dálkového ovládání DEVO 7

Li-po - Lithium Polymerový akumulátor

KK2 – Řídící jednotka KK2

R1, R2, R3, R4 – Regulátory pro BLDC motory od firmy TURNINGY

M1, M2, M3, M4 – BLDC motory od firmy TURNINGY

4.2 Napájecí zdroj

Celá Quadroptéra je napájena z tříčlánekového Li-PO akumulátoru o jmenovitém napětí jednoho článku 3,7 V. Zapojením těchto článků do série vznikne celkové napájení 11,1 V.

Tímto napětím jsou napřímo napájeny regulátory pro synchronní střídavé rotory. Ostatní zařízení pracují s napěťovými úrovněmi 5 V.

K vysílači, který byl původně konstruován na provoz tužkových baterií a vzhledem k odebíranému proudu až 230 mA byl značně neúspěšný, byl pořízen akumulátor Li-Fe, který je tříčlánekový o jmenovitém napětí článku 3,3 V a celkovém napětí 9,9 V. Jelikož byl provoz na tužkové baterie značně neúspěšný, byl pořízen tento akumulátor. Bylo tedy nutné udělat zásah do vysílače a provést univerzální redukci na akumulátor a pouzdro tužkových baterií.

Z důvodů prvních pokusů s létajícím strojem byla k těmto akumulátorům pořízena také nabíječka od firmy TURNINGY Accucel-6, aby bylo možné rychle a pohodlně tyto akumulátory nabít, jelikož při letu vydrží baterie cca 10 minut. Cílem bylo tyto akumulátory rychle a efektivně dobít.

Vícečlánekové akumulátory je vhodné nabíjet přes balanční konektor, který je tvořen vyvedenými piny napětí jednotlivých článků. Za pomoci tohoto konektoru nabíječka hlídá napětí jednotlivých článků, a díky tomu se nabíjejí všechny články rovnoměrně a navzájem se mezi sebou vyrovnávají jejich jednotlivá napětí.

Nabíjecí proudy jsou pro každý akumulátor různé, nejčastěji je zjistíme přímo z údajů na akumulátoru od výrobce.

Parametry od výrobce:

Specifikace:

Vstupní napětí: 11 ~ 17V

Obvod napájení: max. nabíjení: 50W / Max Absolutorium: 5W

Nabíjecí proud rozsah: 0,1 ~ 6.0a

Ni-MH/NiCd článků: 1 ~ 15

Li-ion/Poly článků: 1 ~ 6

Pb baterie napětí: 2 ~ 20V

Hmotnost: 355 g

Funkce:

Mikroprocesorem řízený

Delta-peak citlivost (NiMH / NiCd)

Jednotlivé buňky vyvažování

Li-Ion, LiPo a LiFe schopné

Ni-Cd a NiMH schopné

Velký rozsah nabíjecího proudu

Skladujte funkce, umožňuje bezpečné uložení aktuální

Časový limit funkce

Vstupní napětí sledování. (Chrání auto baterie na poli)

Ukládání dat (Store až 5 balení v paměti)

Baterie přerušení a cyklistiku.

4.3 Komunikace

V posledních letech se bouřlivě rozvíjí bezdrátový přenos. To, co bylo dříve vyhrazeno pouze telegrafii, později rozhlasovému či televiznímu vysílání, armádě, policii a dalším speciálním službám, se postupně stalo součástí dnes již běžně používaných zařízení satelitních přijímačů, mobilních telefonů apod. [2].

Komunikační prostředky lze rozdělit do tří skupin a to:

Simplexní- jednosměrný provoz od vysílače k přijímači

Poloduplexní- každé zařízení může vysílat i přijímat, ovšem je nutné přepínat funkce např. vysílačka.

Duplexní – obě zařízení dokážou najednou vysílat i přijímat bez jakéhokoliv omezení.

Jelikož je tato konstrukce určena pro bezdrátové létání, bylo potřeba najít na současném rozsáhlém trhu takovou komunikační jednotku, která by počtem kanálů vyhovovala této práci. Z finančních důvodů a z odpovídajících parametrů nejvíce vyhovovala komunikační jednotka DEVO7, jejíž výhodou je, že obsahuje 7 kanálů, díky kterým může být konstrukce nadále rozšiřována. V základním letovém modu využívá konstrukce 5 základních kanálů. Zbýlé 2 budou použity na ostatní aplikace, kterými bude tato práce rozšiřována. Vysílač včetně přijímače pracuje v pásmu 2,4 GHz.

Technická data vysílače:

Sedmikanálový mikroprocesorový systém

Frekvence: 2,4 GHz

Výstupní výkon menší nebo roven 100mW

Maximální odebíraný proud: 230ma

Napájecí zdroj 8x NiCd/NiMh (9,6V 600mAh) nebo 8AA článků, 1600-2000 mAh

Šířka signálu serv 1,0-2,0 ms (neutrál 1,5 ms)

Technická data přijímače:

2,4 GHz sedmikanálový přijímač

Citlivost -105dBm

Selektivita větší než 4m

Hmotnost 11.6g

Rozměry 43x28x16mm

Doporučená baterie 4,8V-6V/1300mAh

4.4 Řídící jednotka

V této konstrukci byla použita řídící jednotka KK2, jedná se o řídící jednotku, která obsahuje integrovaný displej, což je pohodlnější k jejímu přímému programování.

Tato jednotka je srdcem celé konstrukce, jelikož přijímá řídící impulzy z přijímače, které dále zpracovává a posílá je podle nastaveného softwaru dále do regulátoru.

Tato řídící jednotka je vybavena tříosým gyroskopem a akcelerometrem. Celou jednotku řídí Atmelmega s 32 kB pamětí. Jednotka má tu výhodu, že k jejímu nastavení nepotřebujeme žádné jiné zařízení (počítač atd.) díky jejímu displeji.

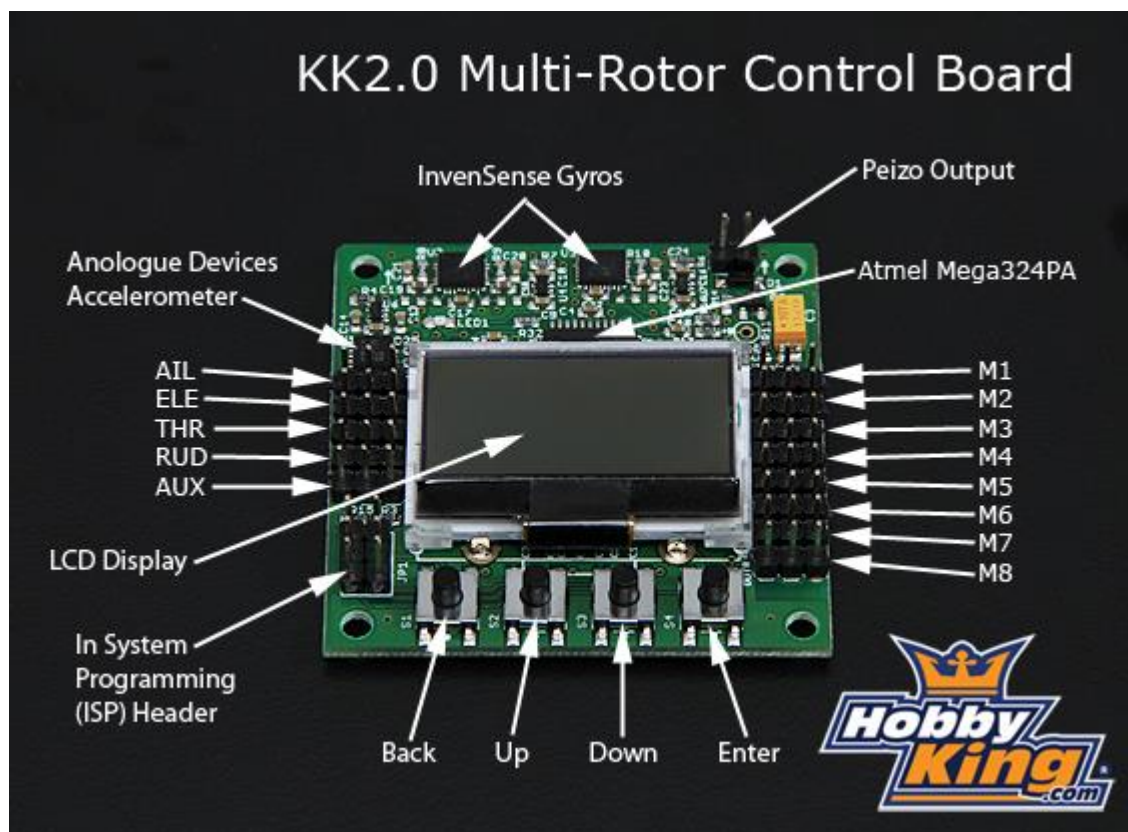
Řídící jednotka pracuje na principu PI regulátoru, před samotným letem je ji třeba odjistit, jelikož je kvůli bezpečnosti zamčena.

PI-regulace má zde tuto funkci:

PI – regulátor – v uzavřeném regulačním obvodu odstraňuje trvalou regulační odchylku, kterou bychom měli při použití P regulátoru. Zlepšuje stabilní vlastnosti vzhledem k použití čistě I regulátoru. Pro určitá nastavení stavitelných parametru regulátoru vyhovuje z hlediska stability i pro integrační regulované soustavy. V počátku regulačního pochodu převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky [1].

Je zde tedy potřeba nastavit spoustu prvků, např. jednotlivé složky P a I regulátoru. Dále je nutné vyzkoušet, zdali řídící jednotka KK2 správně komunikuje s vysílačem, nastavit citlivost ovládání a jednotlivé hodnoty P a I složek self-levelu, ověřit funkčnost všech čidel, kalibrování senzoru, určit typ konstrukce, rychlosti atd.

Tato řídící jednotka je napájena jedním s regulátorů, jelikož pracuje s PPM signálem, který obsahuje dva vodiče– napájecí a jeden datový.



7. obrázek: řídící jednotka KK2 [1]

Přehled konkrétního nastavení jednotlivých prvků, v jednotlivých položkách menu, řídící jednotky KK2 pro realizovanou quadrokoptéru:

PI editor	Aileron	Elevator	YaW
P Gain	120	120	120
P Limit	100	100	20
I Gain	50	50	50
I Limit	20	20	10

Tabulka 1: PI editor

Mode settings	
SelfLevel	Aux
Arming	stick
Link rollpitch	Yes
Auto disarm	Yes
CPPM enablet	No

Tabulka 2: Mode settings

StickScaling	
Roll(Ail)	35
Pitch (Ele)	35
Yaw (rud)	70
Throttle	70

Tabulka 3: StickScaling

Miscsettings	
Minimum throttle	20
HeighDampening	0
Heigh D. Limit	30
Alarm 1/10 volts	0
Servofilter	0

Tabulka 4: Miscsettings

Mixer editor	CH1	Ch2	Ch3	Ch4
Throttle	100	100	100	100
Aileron	-71	71	71	-71
Elevator	71	71	-71	-71
Rudder	100	-100	100	-100
Offset	0	0	0	0

Tabulka 5: Mixer editor

Selflevelsettings	
P gain	60
P limit	60
AccTrimRoll	0

Tabulka 6: Selflevelsettings

Všechny tyto číselné hodnoty v jednotlivých položkách menu řídicí jednotky KK2 bylo třeba určit experimentováním s celým zařízením, které po dobu praktických ladících zkoušek bylo za pomoci lanek napevno připevněno k pevným bodům.

4.4.1 Senzorický subsystém řídicí jednotky KK2

Systém senzorů je nezbytnou součástí celého stroje, bez použití těchto senzorů bychom nemohli dosáhnout stability zařízení při letu. Tyto senzory mají pomocnou funkci a mají za úkol usnadnit pilotovi let. Senzory tedy poskytují zpětnou vazbu pro řídicí jednotku, která pak na základě tohoto vyhodnocení provádí stabilizaci.

DRUHY SENZORŮ

Základním požadavkem při letu stroje je udržet celé zařízení ve vodorovné poloze. Toho můžeme dosáhnout za pomoci gyroskopu a akcelerometrů. Při použití těchto prvků je velice důležité znát jejich základní hodnoty náklonu vůči referenčnímu rovnému povrchu. Tyto hodnoty jsou řídicí jednotkou uloženy a na základě změny od referenčního stavu probíhá vyhodnocení. Řídicí jednotka umožňuje tyto hodnoty kdykoliv přesněji kalibrovat.

Gyroskopy jsou senzory, s jejichž pomocí můžeme měřit úhlovou rychlost. Pokud známe jejich referenční pozici se zemí, tak je možné jejich integrací získat úhel pootočení v dané ose. Použitím tří gyroskopů lze tedy získat náklon ve třech osách.

Akcelerometry jsou senzory, díky kterým je měřeno zrychlení neboli akcelerace. Na celém povrchu zeměkoule je tíhové zrychlení g o hodnotě $9,81\text{ms}^{-2}$. Pokud použijeme trojici akcelerometrů kolmých na sebe v jednotlivých osách X, Y, Z, je posléze možné měřit přímý náklon zařízení v těchto osách. Pokud je akcelerometr ve směru tíhového zrychlení, má konstantní hodnotu výstupu, ovšem pokud zrychlí, tak se tato výstupní hodnota sčítá s tíhovým zrychlením. Vzniklá výslednice je jiná než základní klidová hodnota.

Tyto senzory jsou aktivní pouze v případě manuálního zapnutí položky SELF level na vysílači zařízení. Tento druh módu uvádí zařízení do stabilního stavu.

4.4.2 Stabilizace

Cílem stabilizace je maximálně usnadnit obsluhu quadrokoptéry při řízení, nebo v případě autonomního letu usnadnit řízení nadřazenému systému. Požadavků na stabilitu může být mnoho, některé jsou více či méně důležité a odvíjí se od cílových požadavků projektu. Mezi tyto požadavky patří stabilizace náklonu robota, kurzu, výšky letu, pohybu do stran, nebo také globální stabilizace, jako je například stabilizace na danou zeměpisnou polohu. Cílem této práce je v první řadě zajistit snazší obsluhu a ovladatelnost quadrokoptéry. Kladeny jsou proto přísné požadavky na stabilitu – stabilizace náklonu a stabilizace kurzu. Cílem je tak stabilizace rotačních pohybů quadrokoptéry okolo všech jejích os.[12]

STABILIZACE NÁKLONU

Cílem stabilizace náklonu je snaha o zamezení uhlového natočení v jednotlivých osách X, Y a udržení stroje ve vodorovné pozici, což je díky běžným okolním podmínkám mnohokrát znemožněno.

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, gyroskopy jsou předem kalibrovány s referenční pozicí, která je následně vyhodnocena řídicí jednotkou KK2 a na základě vyhodnocení změny od referenční pozice je provedena stabilizace náklonu.

Náklon quadrokoptéry lze přímo regulovat zvýšením tažné síly jednotlivé dvojice vrtulí.

4.4.3 Vyvážení quadrokoptéry

Nejprve je potřeba nastavit regulátory za pomoci programovací karty do jejich pracovního režimu, který odpovídá jejich správné funkci.

Dále je nutné určit jednotlivé velikosti složek v řídicí jednotce, a to především nastavení proporčních a integračních složek jednotlivých limitů, nastavení citlivosti ovládání atd. Jelikož na toto nastavení nejsou známy konkrétní hodnoty, musely být získány pomocí experimentování. Nastavení těchto hodnot se velice často liší, jelikož každé podobné zařízení je určitým způsobem jiné. A to buď konstrukčními rozměry, těžištěm, váhou a výkonem rotorů. Tudíž může být chování jednotlivých strojů rozdílné.

Proto se musí zařízení vhodně nastavit v řídicí jednotce, aby ovládání nebylo moc hrubé, ale ani příliš citlivé. Pro uživatele je toto nastavení zásadně důležité a je třeba si prakticky vyzkoušet, které hodnoty jsou nejvhodnější. Tato citlivost se konkrétně nastavuje v položce STICK SCALLING, kde se ubírají procenta citlivosti na jednotlivé pohyby stroje a to: akcelerace („plyn“), klopení, klonění, bočení. Pro náš případ je vhodné 100% citlivost snížit na polovinu, čili 50%, čím větší procento nastavíme na jednotlivé pohyby, tím bude zařízení citlivější, naopak čím menší, tím více bude ovládání hrubé.

Quadrokoptéru je vhodné kalibrovat v ukotveném stavu, fixovanou lankou nebo provázky k pevným bodům.

Pokud je celé zařízení plně vyváжено, je vhodné nastavit co největší velikost proporční a integrační složky, a to až na mez stability, dokud se celé zařízení nerozkmitá. Poté se tato hraniční hodnota nepatrně sníží a uloží.

4.4.4 Statická kalibrace vrtulí

U všech létacích strojů hraje velkou roli vyváženost a rovnoměrné rozložení těžiště.

To samé platí i u vrtulí, jejichž hmotnost sice příliš neovlivní těžiště celého zařízení, ovšem problém nastává tehdy, když nám začne kvůli této nevyváženosti nepravidelně zabírat rotor.

Důsledky nevyvážených vrtulí jsou různé, ovšem nejčastěji je rotor mnohem více zamětnán a po akustické stránce je mnohem více hlučný, v horších případech mohou rotory při nižších otáčkách úplně vypadnout.

Nejjednodušší způsob jak zrealizovat statické kalibrování vrtulí, což je možné i bez složitého vybavení, je takový, že se vrtule nasadí na hřídel nebo jinou tyč stejného průměru a následně se např. ve svěráku nebo v jiném rovném přípravku zkouší její vyváženost, která by se v ideálním stavu měla projevit tak, že se vrtule bude křídélky držet ve vodorovné pozici. Pokud by tyto vrtule nebyly vyváženy, pak lze situaci vyřešit tím, že se na nevyhovující stranu přilepí kousky vhodného materiálu (např. izolepy) tak, aby vrtule měla těžiště ve své ose.

Tento problém nastává především u rozměrově větších vrtulí, ovšem může se stát, že se nevyváženost vyskytne i u malých plastových vrtulí.

Po provedených praktických letových testech, byl u zkonstruované quadrokopty tento problém vyhodnocen jako nezávažný a příliš časově náročný k řešení. Byl proto prozatím zanedbán. Principy a způsoby vyvažování vrtulí, ale i rotorů jako celku, by byly vhodným tématem pro další práci.

4.5 Regulátory

Regulátorem je nazýváno zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace. Do regulátoru zahrnujeme obvykle – kromě regulované soustavy všechny členy regulačního obvodu. Podstata činnosti regulátoru spočívá ve vyhodnocení regulační odchylky

$$e(t) = w(t) - y(t)$$

jako vstupního signálu ve zpracování této odchylky podle zákona řízení, který je vlastní použitému regulátoru, a ve vytvoření výstupního signálu – akční veličiny s cílem takovým, aby odchylka $e(t)$ byla eliminována zcela nebo aby byla co nejmenší [1].

Jelikož jsou v této konstrukci použity synchronní stejnosměrné bezkomutátorové motory označované BLDC, je zde třeba použít střídavé měniče, které nám budou vhodně napájet tyto motory. Frekvenční měniče neboli regulátory vybíráme především podle parametrů daného motoru, kde nejdůležitějším parametrem je maximální odběr motoru a jeho napájecí napětí.

Tyto regulátory pracují s PPM signálem, což je analogový signál, kde je informace úměrná šířce pulzu. PPM signál se liší od PWM tak, že obsahují datový paket impulzů obnovovaných každých 20ms, zato u PWM je signál generován stále stejně souměrně, pokud není právě regulován.

Pulzy u PPM jsou obnovovány s periodou 20ms. Minimální výchylka signálu má pulz o šířce 1,0ms pro maximální výchylku 2,0ms a střední nulová výchylka odpovídá 1,5ms. Tyto údaje mohou být podle jednotlivých výrobců různé, ovšem signál je vždy stejný. U tohoto signálu se také rozlišuje aktivní stav tzv. log 1 a log 0.

BEC -(battery eliminating circuit) - stabilizátor napětí, které mění napětí akumulátoru např. na začátku zmiňovaných 12,6V právě na 5 nebo 6 V, je napájen odbočkou z akumulátoru (nezapojeno) a přijímač je napájen z BECu přes konektor BAT - kabel je protažen odrušovacím kroužkem. Výhoda tohoto řešení je jasná - nemusíme vozit přijímačový AKU a hlídat jeho napětí, ale zároveň nevypadne ovládání při přehřátí ESC (ochranná elektronika). Mimochodem tento regulátor vestavěný BEC vůbec nemá, ale o tom v dalším článku. Je možné použít ESC s vestavěným BECem a zároveň externí BEC - v tomto případě je však nutné přerušit červený plusový vodič z ESC do přijímače. Toto řešení je na následujícím obrázku. Regulátor sice má také 3žilový kabel z přijímače, ale používá pouze černý (-) a bílý (signál) [5].



8. obrázek: Regulátor od firmy TURNIGY [7]

Současný trh těchto regulátorů je velmi široký, po pečlivém zvážení byl pro prvotní pokusy a testy s koncepcí multikoptéry vybrán regulátor od firmy TURNIGY Plush 30A Speed Controller, který byl pořízen kvůli jeho dostatečné proudové rezervě a relativně nízké ceně.

Parametry regulátoru od výrobce:

ContCurrent: 30A

BurstCurrent: 40A

BEC Mode: Linear

BEC : 5v / 2A

LipoCells: 2-4

NiMH : 5-12

Weight: 25g

Size: 45x24x11mm

4.5.1 Kalibrace regulátoru

V této práci jsou využívány regulátory od firmy TURNIGY, jedná se o programovatelné regulátory, které se programují za pomoci programovací karty, je zde třeba nastavit vhodné parametry tak, aby regulátor byl správně nastaven do pracovního režimu.

Vzhledem k počtu rotorů je potřeba použít čtyři programovatelné regulátory, které se musí nastavit do pracovního módu.

Programovací karta po připojení signalizuje jednotlivé možnosti, které je možno nastavit.

Jsou to:

Brzda: Ano/ Ne

Typ baterií: LiPo/ NiMh

Způsob vypnutí motoru: Pozvolna/ Skokově

Vypínací napětí: malé/ střední / vysoké

Rozběh motoru: Velmi pomalý/ Pomalý/ Okamžitý

Časování motoru: malé/ střední / vysoké

Muzika, kterou se regulátor hlásí při připojení baterie

Governor mód- pro vrtulníky: Zapnuto / Vypnuto

Na programovací kartě byly nastaveny možnosti pro náš typ stroje, a to:

Brzda: Ne (V této konstrukci není potřeba a navíc je při použití této možnosti vyšší odběr proudu.)

Typ Baterii: Li-PO (Použitý typ baterií v tomto případě akumulátor LI-PO.)

Způsob vypnutí motorů: Pozvolna (Z důvodu menší spotřeby.)

Vypínací napětí: střední (Pro každou baterii jsou hodnoty jiné, pro LI-XX jsou definována tato napětí 2,6V/2,85V/3,1V – nízké/střední/vysoké. Pokud napětí tříčlánekového akumulátoru Li-PO klesne pod 2,85V- což je hodnota napětí jednotlivých článků, při kterém se zařízení vypne, $2,85 \cdot 3 = 8,55V$ čili pokud klesne napětí baterie pod tuto úroveň napětí 8,55V, tak se zařízení vypne, tato možnost nám prodlužuje životnost akumulátorů, jelikož je nenecháváme vybít až na jejich samotné dno.)

Rozběh motoru: Pomalý (Normální je doporučen především pro letadla, ale pro více rotorová zařízení je lepší pomalejší rozběh.)

Časování motoru: Malé (Ve většině případů je malé časování plně dostačující pro většinu motorů, pro více pólové motory může být nastaveno časování vysoké.)

Muzika, kterou se regulátor hlásí při připojení baterie: Libovolná možnost

Governor mód- pro vrtulníky: Vypnuto (Nevhodné pro jiná zařízení.)

4.6 Akční členy

Z konstrukce quadrokoptéry je na první pohled zřejmé, že obsahuje čtyři akční členy a těmi jsou speciální rotory, které pohánějí vrtule.

U těchto motorů je velice důležitý správný výběr, jelikož musíme brát v potaz tahové vlastnosti, aby zařízení vůbec vzlétlo, hmotnost a hlavně proudové zatížení, aby byl akumulátor schopen tyto motory napájet.

Je proto dobré udělat si určité rezervy v tahových vlastnostech, otáčkách motoru a odběru celkového proudu. Při nedodržení správných parametrů při výběru komponent by zařízení nemuselo vůbec vzlétnout a některé komponenty by mohly být v krajních případech i zničeny.

4.6.1 Elektromotory BLDC

Jedna z definic synchronního točivého stroje je, že synchronní stroj je střídavý elektrický stroj točivý, jehož frekvence svorkového napětí je úměrná otáčkám.

Neboli:

Synchronní stroj, který přivedenou mechanickou energii proměňuje na energii elektrickou, se nazývá alternátor a naopak stroj měnící elektrickou energii v mechanickou pracuje jako synchronní motor. Synchronní stroj, tak jako asynchronní, se skládá z otáčivé části (rotoru) a pevné části (statoru). Rotor se otáčí synchronně s točivým magnetickým polem statoru. Jeho rychlost je synchronní [3].

Jelikož je quadrokoptéra stroj, který se v této kategorii prostředků pohybuje především ve vzduchu, je zde velice důležitým parametrem její hmotnost. Čím je její hmotnost větší, tím se zvyšuje tahová síla pro vzlet, což má za důsledek větší odběr proudu z akumulátoru a ve výsledném efektu mnohem kratší dobu létání. Je tedy vhodné vybrat motory co nejlehčí, ale s co největší možnou účinností. V této práci jsou použity bezkomutátorové synchronní elektromotory, které mají mnohem větší účinnost než běžné komutátorové motory, jelikož zde nevzniká jiskření od uhlíkových kartáčů, které často způsobovalo rušení pro komunikační jednotku. Díky tomu nedochází k žádnému opotřebení a motory mají mnohem vyšší životnost. Jedinou nevýhodou je, že jejich řízení je poněkud složitější než jaké bývá u běžných motorů, proto je zde potřeba použít regulátor specifické konstrukce.

Zdroj[3] k tomu uvádí:

Tyto motory jsou určitou obdobou synchronních motorů. Magnetické pole statoru je úměrné frekvenci otáček rotoru.

Tento motor obsahuje na rotoru permanentní magnety, které jsou spojeny s jeho rotačním pláštěm, stator obsahuje jednotlivá vinutí uprostřed motoru, která vytvářejí magnetické pole.

Stator je ovládán za pomoci stejnosměrné PWM, kde je posíláno do jednotlivých vinutí příslušné impulzy.

Malé synchronní stroje bývají někdy bez buzení. Budicí systém nahradí rotor s permanentním magnetem.

Vztah mezi otáčkami synchronního stroje n_s a frekvenci indukovaného napětí ve statoru f je určen vztahem (27):

$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} \quad p - \text{počet pólů} \quad (27)$$

je-li u trojfázového alternátoru dáno sdružené napětí U_s ve voltech, proud I_s v ampérech, účinnost n a zdánlivý výkon S v kilovoltampérech, je potřebný výkon poháněcího stroje v kilowattech (28):

$$P_r = \frac{S \cdot \cos \varphi}{n} \quad (28)$$

Protože (29), (30):

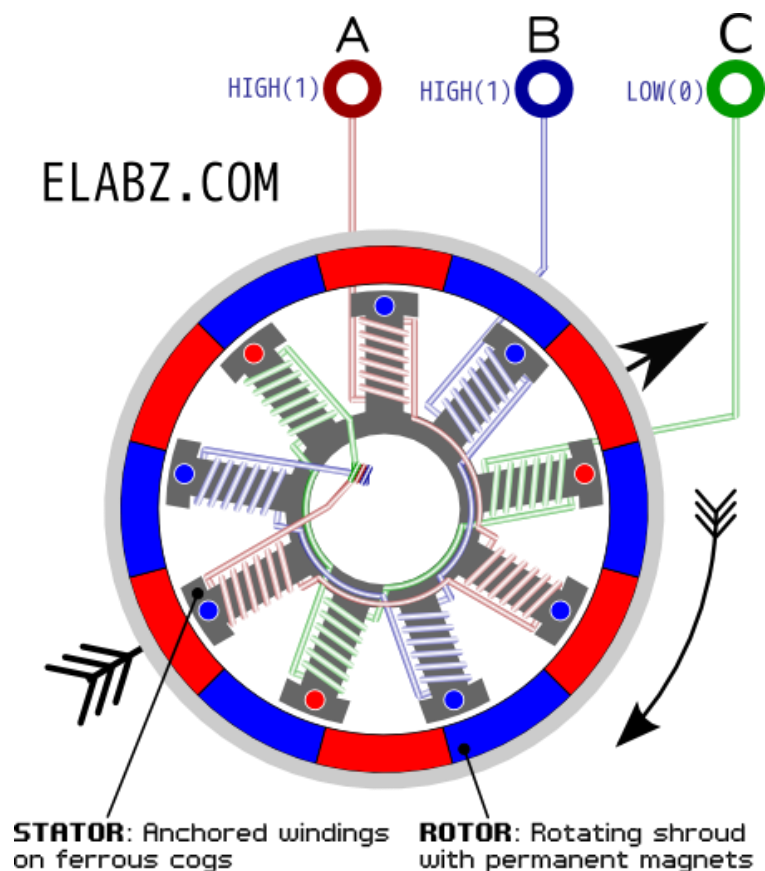
$$P = S \cdot \cos \varphi \quad ; \quad n = \frac{P}{P_r} \quad (29), (30)$$

Kde platí (31):

$$P_r = \frac{P}{n} = \frac{S \cdot \cos \varphi}{n} \quad (31)$$

Kde P je skutečný neboli činný výkon, P_r - výkon + ztráty

Princip stejnosměrného bezkomutátorového synchronního motoru:



9. obrázek: Stejnosměrný synchronní bezkomutátorový motor [8]

Na obrázku je možné vidět princip funkčnosti motoru. Vinutí cívek je umístěno uvnitř a rotor je z permanentních magnetů spojen s pláštěm. Motor je mechanicky mnohem snazší vyrobit, když jsou vinutí navinuta zvlášť, než je tomu u jiných motorů, kde jsou složitě zandávány do drážek.

V této konstrukci je použit motor **NTM Prop Pohon Series 28-26A 1200 kv** od firmy TURNINGY, je to bezkomutátorový střídavý motor, který byl vyvinut pro modelářské aplikace. Tah těchto podobných motorů se pohybuje v rozmezí 500-1100g, plně tedy postačuje pro tuto konstrukci. Hřídel je připevněna k vnější robotující části motoru, proto bylo třeba vyvinout speciální úchyt motoru z materiálu na plošné spoje, který je pevný a lehký.



10. obrázek: NTM Prop Pohon Series 28-26A 1200 kv od firmy TURNINGY [9]

Výhody oproti stejnosměrným kartáčovým motorům:

- dlouhá životnost
- veliké zrychlení
- vysoká účinnost
- žádné rušení
- vyšší rozsah rychlosti

Základní parametry motoru jsou shrnuty zde:

Kv (rpm / v) - 1200

Hmotnost (g) - 57.6

Max proud (A) - 18 Odpor (mh) - 0

Max napětí (V) - 15

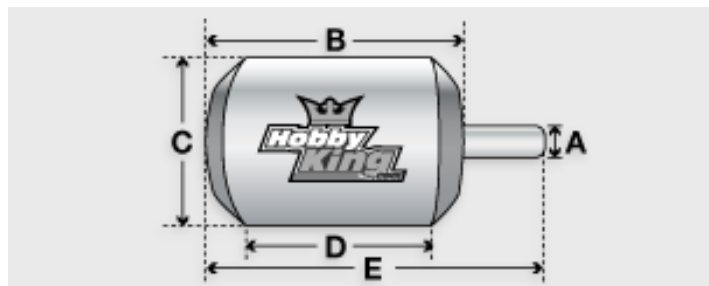
Výkon (W) - 250

Délka B (mm) - 26

Průměr C (mm) - 28

Délka D (mm) - 15

Celková délka E (mm) - 42



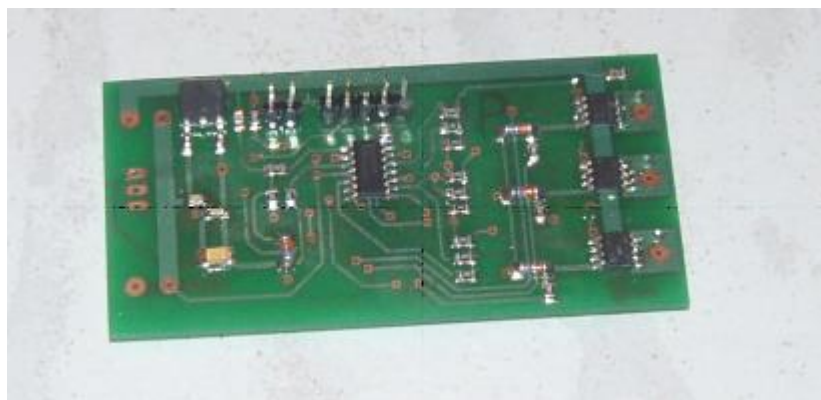
11. obrázek: konstrukční konstanty motoru [9]

5 Popis funkce vlastního regulátoru

Regulace je řízení, při němž se skutečný stav zařízení porovnává s požadovaným stavem, a na základě tohoto srovnání se provádějí takové zásahy, aby regulovaná veličina reagovala s požadovanou přesností a dynamikou na požadované změny.

Žádaná hodnota vystupující ze zadávacího členu je porovnávána se skutečnou hodnotou z měřicího členu. Na základě zpracování regulační odchylky vzniklé odečtením obou těchto hodnot regulátoru (ve vyhodnocovacím členu) vznikne akční veličina ovládající akční členy. Regulace je vesměs automatická, ale zadání žádané hodnoty může být jak ruční, tak i automatické[2].

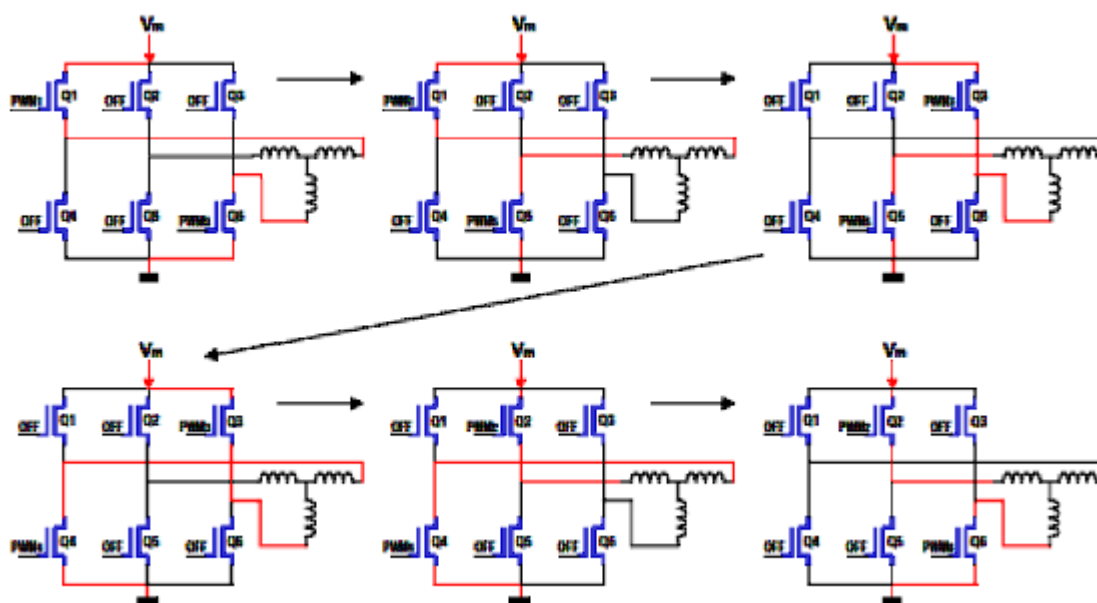
Schéma je rozděleno do tří částí a to napájecí, řídicí a silové, celý regulátor je napájen přímo z baterie a následně je převedené napětí stabilizováno za pomoci dvou stabilizátorů, které jsou zde použity kvůli velké proudové náročnosti.



12. obrázek: Realizovaný regulátor

Regulátor napájí stejnosměrné bezkomutátorové motory, které mají zapojené vinutí do hvězdy, a jsou spínány za pomoci PWM, a to tak, že procesor střídavě otevírá vhodné dvojice silových tranzistorů, kterých je zde šest. Tyto tranzistory obsahují integrovanou diodu kvůli vysokému přepětí indukční zátěže, která by mohla tranzistor zničit. Zbylé tranzistory mají budicí funkci pro silovou tranzistorovou část, jelikož procesor by nebyl schopen dodat tak velký budicí proud pro jejich dostatečné otevření.

Typické ovládání třífázového BLDC motoru se skládá ze šesti kroků se 120° vodivým módem. Dvě fáze vedou v jeden okamžik proud, třetí vinutí je plovoucí. V tuto chvíli je na třetí plovoucí fázi indikováno zpětné EMF („zpětná elektromotorická síla“).



13. obrázek: spínací sekvence jednotlivých tranzistorů[11]

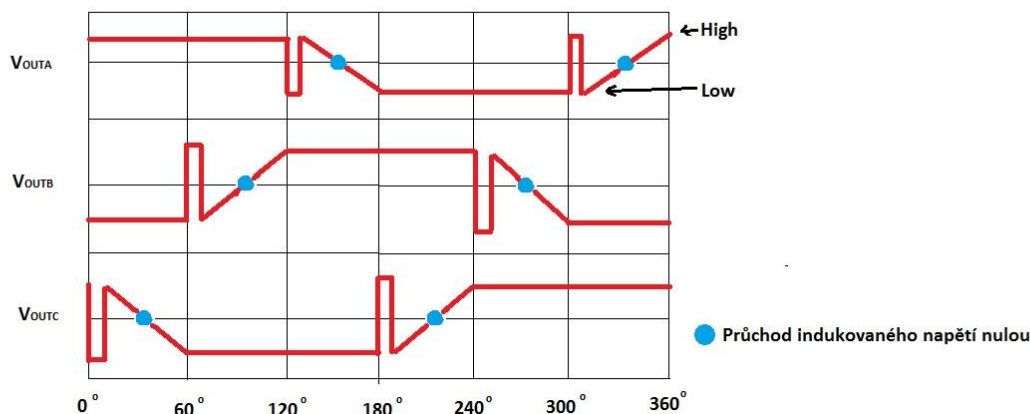
Na plovoucím vinutí cívky je indukováno napětí, které je dále za pomoci komparátoru porovnáváno a zpracováváno procesorem, který na základě této zpětné vazby vysílá řídicí impulzy do silové části.

Průběhy napětí na jednotlivých vinutích:

Hodnoty napětí jednotlivých 6 stavů pro obrázek 14. na jednotlivých vinutích jsou v tab.

Stav:	V_{OUTA}	V_{OUTB}	V_{OUTC}
1	High	Low	EMF
2	High	EMF	Low
3	EMF	High	Low
4	Low	High	EMF
5	Low	EMF	High
6	EMF	Low	High

Tabulka 7: Logické úrovně jednotlivých stavů fází pro obrázek 14.



14. obrázek: Ilustrativní napěťové průběhy jednotlivých fází při měření EMF

5.1 Snímání EMF

Jedná se o snímání napětí. Motor, který využívá tuto metodu, nemá zdánlivě vůbec žádné snímání polohy hřídele. Pokud však pro napájení cívek statoru použijeme dnes nejběžnějšího způsobu šesti on-off výkonových spínačů, každá z cívek je po dobu 60° otáčky hřídele nepřipojena ke kladnému, ani k zápornému pólu napájení. Na této cívce je možné v této době měřit protinapětí. V určité době prochází toto napětí nulou, protože je sinové a střídavé. Pokud změříme tento průchod nulou s dostatečnou spolehlivostí, můžeme jej použít jako informaci o poloze hřídele. Zbytek je téměř stejný jako u Hallovy sondy [4].

5.2 Tranzistory

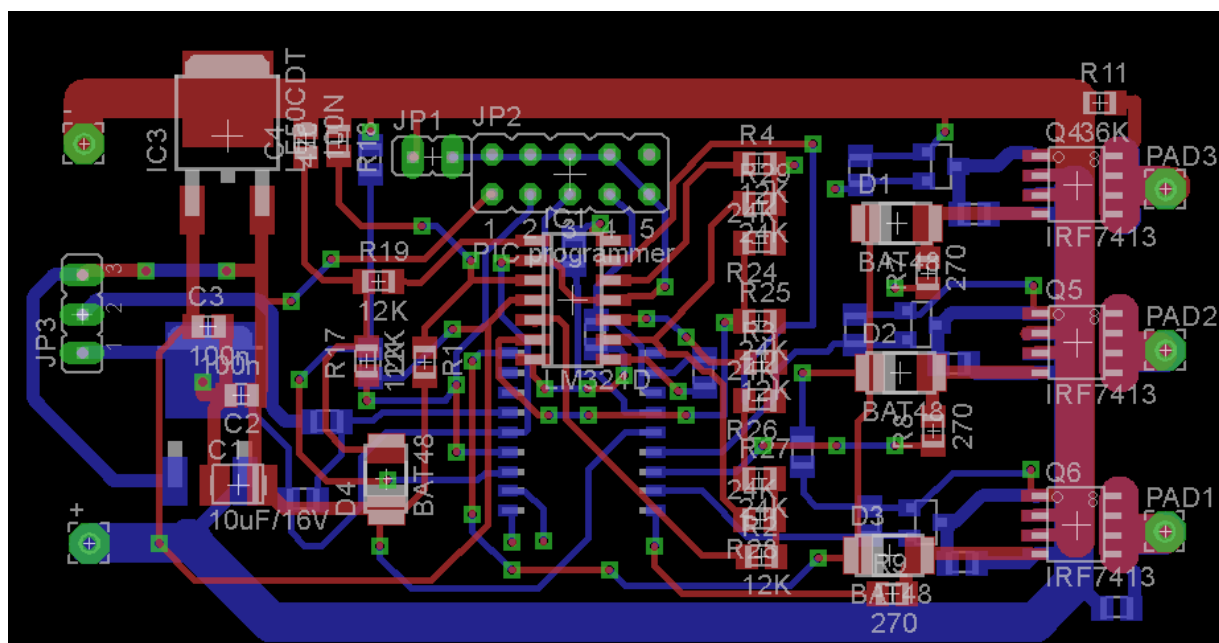
Dříve se používaly v těchto aplikacích bipolární tranzistory, které měly celkem nízké saturační napětí U_{ce} , všechny tyto tranzistory pracují s proudovým zesilovacím činitelem H_{21e} v rozmezí 10-20. To znamená, že při jejich vybuzení vznikají poměrně velké proudové ztráty, je tedy vhodné použít Darlingtonovo zapojení dvou tranzistorů, kde je sice budící proud několikanásobně nižší, ale zato proudový zesilovací činitel h_{21e} má hodnotu něco okolo 1000. Dochází tedy ke snížení budícího proudu, ale zvýší se tím ztráty úbytkem napětí. Proto je Darlingtonovo zapojení dvou tranzistorů vhodné ve výjimečných situacích pro malé proudy a vysoké napětí.

Tranzistory mosfet, které se budí napětím podobně jako dřívější elektronky, pracují na principu on / off – vypnuto zapnuto, řídící elektroda gate neodebírá téměř žádný proud, spínací vlastností není saturační napětí, nýbrž odpor v sepnutém stavu mezi elektrodami D a S. Tento odpor má hodnotu cca 0,003 OHM. Tyto tranzistory pracují s velkými proudy, v mojí konstrukci pracují s trvalým proudem s cca 18A a chvilkově zde protéká i 30 A. Nutné je ovšem všechny tyto tranzistory vybudit vhodným napětím do řídící elektrody gate, v regulátoru se o vhodné načasování řídících impulsů stará procesor.

5.3 Návrh desky plošných spojů regulátoru

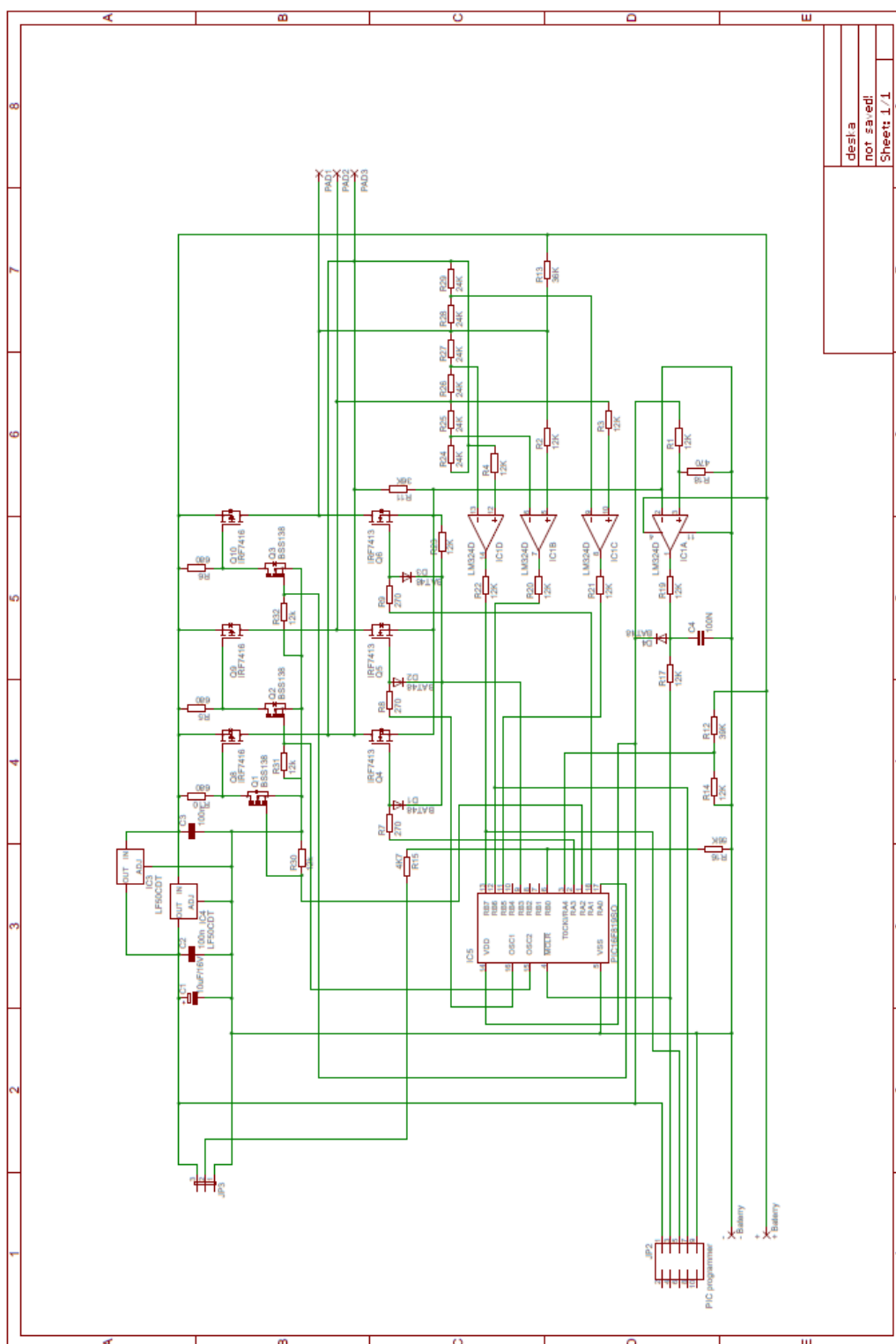
Deska plošných spojů je oboustranná o rozměrech 78x39mm, návrh byl proveden v prostředí eagle 6.3.0. Deska je kvůli úspoře místa a efektivitě oboustranná a je ji možno rozdělit na 3 části, na část napájecí, řídicí a část silovou. Cesty jsou široké od 0,4mm, jsou především v řídicí části, kde netečou velké proudy, a to až po tloušťku vodiče 3mm, která je naopak použita u silové části. V silové části mohou být proudy až o desítkách jednotek ampér a to hlavně tehdy, pokud zařízení pracuje na maximální výkon nebo pokud je rotor prudce mechanicky zabrzděn. Cílem bylo udělat tyto vodiče co nejtlustší a zároveň nejkratší, aby nedocházelo k velkým tepelným ztrátám.

Plošný spoj:



15. obrázek: Plošný spoj navržený v prostředí EAGLE 6.3.0

5.4 Schéma regulátoru



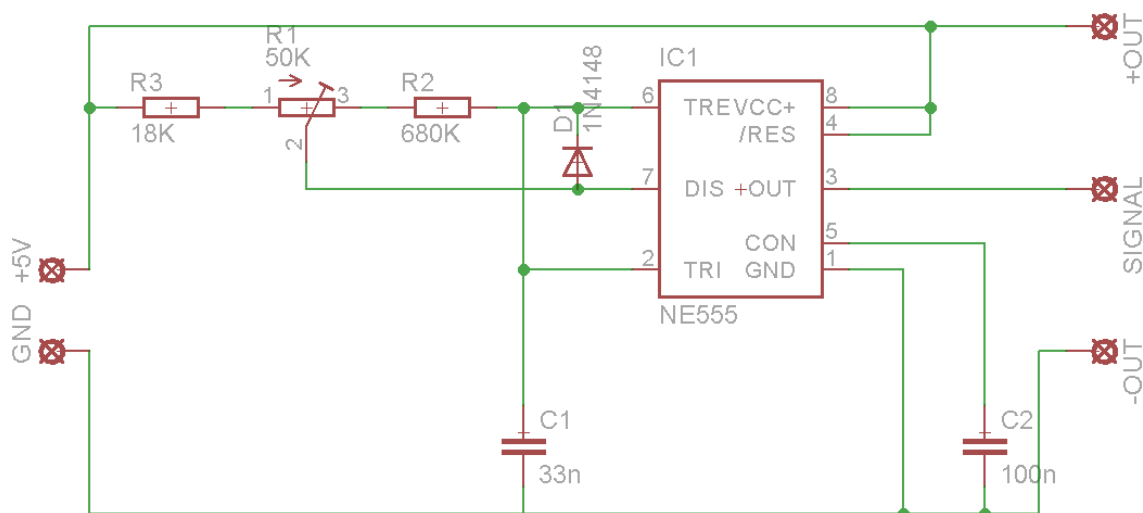
16. obrázek: Schéma regulátoru

5.5 Generátor PPM signálu

Vzhledem k tomu, že předchozí zapojení nelze vyzkoušet jen tak na „prázdnou“, bylo nutné sestavit generátor PPM signálu. Jedná se o konstrukci, která simuluje signál z řídicí jednotky nebo s přijímače (PPM signál) a je schopná dodat potřebné řídicí impulzy pro procesor, který celý proces řídí.

Zařízení generuje obdélníkový signál s šířkou impulsu 1ms-2ms, kde 1,5ms je neutrální pozice.

Odběr celého zařízení je cca 7.5 mA, zařízení je napájeno napětím 5V.



17. obrázek: Schéma generátoru PPM signálu

5.5 Porovnání regulátorů

Návrh vlastního regulátoru by se na první pohled mohl zdát zbytečným vzhledem k množství dostupných výrobků na trhu. Jelikož se však počítá s dalším vývojem multikoptér, je nanejvýš žádoucí mít regulaci rotorů zcela pod vlastní kontrolou, plně pochopit závislosti a chování regulace otáček, mít možnost doplňovat regulaci o různé druhy měření nebo sledování parametrů a to i za letu. Nehledě na skutečnost, že většina komerčních regulátorů je koncipována jako univerzální zařízení pro řízení otáček rotorů ve všech možných dopravních prostředcích, a to převážně jen na úrovni modelářství. Není však určena pro účely profesionální robotiky či průmyslových aplikací obecně.

Pokud bychom porovnávali mezi sebou tyto regulátory, nenašli bychom mnoho rozdílů v základní funkci, ovšem výhody a nevýhody jsou zřejmé:

Regulátor od firmy TURNINGY :

Výhody:

Malý rozměr, více programových funkcí

Nevýhody:

Vysoká cena, nutnost použití externí programovací karty k přeprogramování

Navrhovaný regulátor:

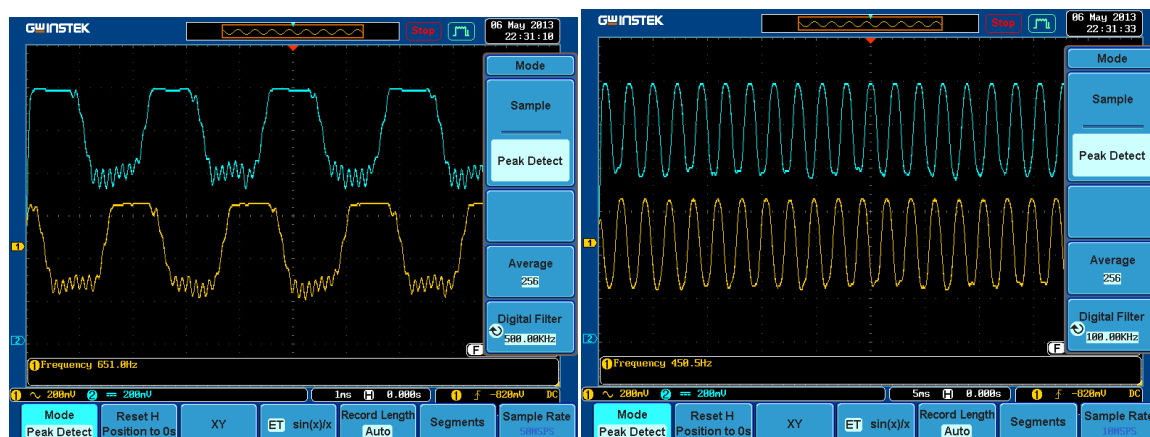
Výhody:

Nízká cena, možnost ovlivnit chování regulátoru, absolutní kontrola nad funkcí, možnost rozšiřování funkce

Nevýhody:

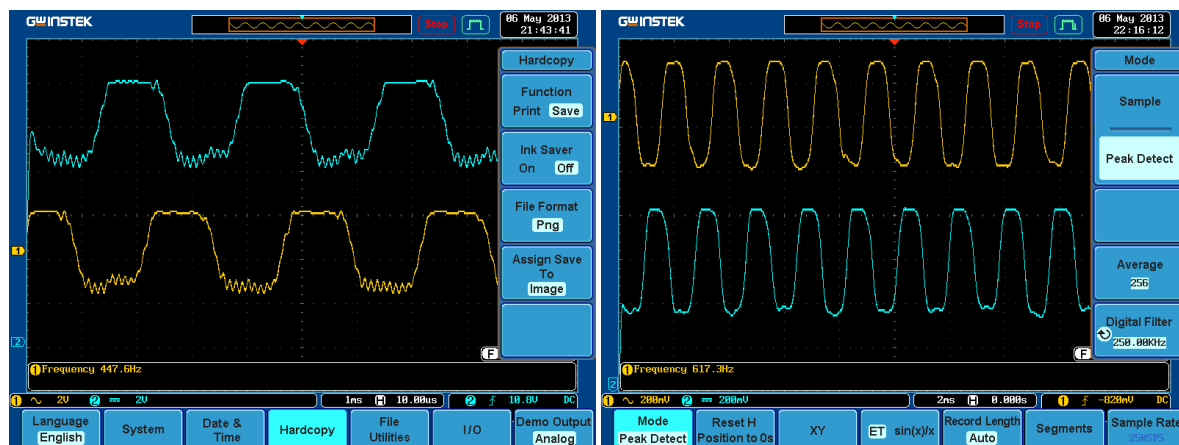
Větší rozměr než u sériově vyráběného regulátoru, pracnost vyplývající z nutnosti použít SMT

Průběhy jednotlivých signálů připojených na BLDC motor :
Komerční regulátor:



18. obrázek: Průběh jednotlivých fází komerčního regulátoru

Realizovaný regulátor:



19. obrázek: Průběh jednotlivých fází navrhovaného regulátoru

Jelikož při porovnání obou regulátorů byl k dispozici pouze dvoukanálový osciloskop, bylo možné měřit pouze dvě fáze. Jednotlivé fáze byly připojeny na BLDC motor a průběhy komerčního a navrhovaného regulátoru vyšly identické. Z průběhu je zřejmé, že jednotlivé fáze jsou mezi sebou posunuty. V záporné části výstupního signálu je ovšem značné zkreslení, které vzniká především kvůli špatnému přechodovému odporu osciloskopických sond. Navíc zde může vznikat i rušení hysterezí daného magnetického materiálu, z kterého je utvořen rotující plášť BLDC motoru. Jelikož tento problém nastal i u regulátoru komerčního, je možné, že zákřivky mohou být tvořeny velmi malým napětím a proudem, které běžný osciloskop nedokáže spolehlivě zpracovat jako plynulý signál.

6 Praktická realizace multikoptéry

Na obrázku je možné vidět hotovou konstrukci multikoptéry, jedná se oquadrokoptéru, která obsahuje 4 rotory spojené hliníkovým rámem. Na zařízení byly dodatečně přidělané ochranné rámy vrtulí z materiálu na výrobu plošných spojů, jehož výhodou je, že je pevný a lehký. Díky nim je celé zařízení bezpečnější a odolnější vůči okolí.



20. obrázek: Realizovaná Quadrokoptéra

7 Závěr

Zadání celé práce se podařilo splnit, což byl pro mě jako laika v této oblasti ještě v září téměř nesplnitelný úkol. Ovšem při studiu problematiky jsem pochopil základní principy celého zařízení a pustil se do práce na praktické realizaci.

Nejprve jsem musel nastudovat, jak takové zařízení jako je quadrokoptéra funguje, abych posléze mohl začít provádět prvotní rozvahu ve výběru základních komponent.

Když byly základní komponenty vybrány, bylo je potřeba nastavit a nadefinovat. V případě řídicí jednotky se jednalo o nelehkou situaci, jelikož nelze přesně a spolehlivě určit, které hodnoty jednotlivých složek odpovídají správné skutečnosti. S tím bylo spojeno dlouhé ladění citlivosti a experimentování s řídicí jednotkou, které vedly ke správnému nastavení.

Tato práce byla dále rozšířena o tvorbu vlastního regulátoru, který byl sestaven z dílčích součástí. Dalším krokem byl návrh plošného spoje v prostředí eagle a následné porovnání s regulátorem komerčním.

Problematika dálkově ovládaných strojů mě velmi zaujala, jelikož tato zařízení jsou velice multifunkční, mohou složit například jako dálkový létající robot přenášející různé předměty. S využitím termokamery mohou najít své uplatnění i v armádě, u policie a v neposlední řadě mohou posloužit i jako zajímavá hračka.

8 Seznam použité literatury

- [1]: Balátě, J. *Automatické řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 663 s
- [2]: Pivonka, P.; Hlinovský, V. *Elektrotechnický seminář*. Praha: ČVUT Praha 6, 2005. 161 s.
- [3]: Vladař, J.; Zelenka, J. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. Praha STNL Praha 1, 1986. 480 s.
- [4]: Hajič, J- *modelářský časopis RCR*. RCR Praha, 2001, 53s
- [5]: *Regulátory a spol polopatě*. [online]. [cit. 2013-01-12]. Dostupné z: <http://www.rc-foto.cz/inpage/esc-bec-ubec-sbec-kdo-se-v-tom-ma-vyznat/>
- [6]: *Internetový portál fuelyourproduct design*" [online]. [cit. 2013-01-14]. Dostupné z: <http://www.fuelyourproductdesign.com/the-rise-of-the-diy-micro-copter/>
- [7]: *TURNIGY Plush 30amp Speed Controller* [online]. [cit. 2013-02-15]. Dostupné z: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/uh_viewitem.asp?idproduct=2164
- [8]: *Internetový portál eLABZ* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://elabz.com/brushless-dc-motor-with-arduino/>
- [9]: *Internetový portál Heureka* [online]. [cit. 2013-02-22]. Dostupné z: <http://prislusenstvi-k-rc-modelum.heureka.cz/stridavy-motor-turnigy-ntm-28-26a-1200kv-250w>
- [10]: *Řídící jednotka KK2 modelářský portál Hobby King* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__24723__Hobbyking_KK2_0_Multi_rotor_LCD_Flight_Control_Board.html
- [11]: *Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů* [online]. 2009 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34707/1/ZaplatilekL_Rizenibezkartacovych_PR-2009.pdf
- [12]: Bláha, P., Vavřín, P. *Řízení a regulace 1*. Brno: VUT Brno: 2005. 214 s.
- [13]: KOPAL, A. a kol. *FYZIKA I*. Liberec: TUL, 2009. 155 s.